

Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy - Ústav letecké dopravy

Laboratorní přípravek na inerciální navigační systémy

Laboratory Preparation for Inertial Navigation
Systems

Autor:

Josef Běhal

Vedoucí práce:

doc. Ing. František Martinec, CSc.

Ostrava 2017

Zadání

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Institut dopravy

Zadání bakalářské práce

Student: **Josef Běhal**
Studijní program: B3712 Technologie letecké dopravy
Studijní obor: 3708R036 Technologie letecké dopravy
Téma: Laboratorní přípravek na inerciální navigační systémy
Laboratory Preparation for Inertial Navigation Systems

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cíl práce: Navrhnout a částečně realizovat laboratorní přípravek na inerciální navigační systém.

Obsah:

1. Analýza typů inerciálních navigačních systémů.
2. Návrh laboratorního přípravku na inerciální navigační systém.
3. Realizace laboratorního přípravku na inerciální navigační systém.

Seznam doporučené odborné literatury:

Draxler, K., a kol.: Digitální technologie/elektronické přístrojové systémy, ČVUT Praha, CERM, s.r.o., Brno 2003.

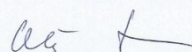
Volner, R.: Elektrický systém, CERM 2006. Učební texty.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

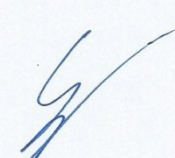
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. František Martinec, CSc.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty





Prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci na téma Laboratorní přípravek na inerciální navigační systém vypracoval samostatně pod vedením pana doc. Ing. Františka Martince, CSc. a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.“

Datum15.5.2017.....

.....
Podpis



Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce
- souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci, obsažené v záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé bakalářské práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledky jejich obhajoby.

Datum 15.5.2017

Podpis Běhal

Jméno a příjmení autora:

Josef Běhal

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Vojnice 33, Těšetice, 78346

Poděkování

"Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Františku Martincovi, CSc., za cenné rady, poskytnuté konzultace a ochotu pomoci při tvorbě této bakalářské práce ."

Anotace

Běhal, J. *Přípravek pro inerciální navigační systém : bakalářská práce*. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, Ústav letecké dopravy, 2017, 49 s. Vedoucí práce: Martinec, F.

Bakalářská práce se zabývá analýzou inerciálních navigačních systémů, návrhem a realizací přípravku tohoto systému. V první části práce je provedena analýza systému. Jsou v ní objasněny základní principy funkce systému, popsány jednotlivé součásti systému, jejich principy funkce a účel. Dále je popsán způsob získávání zeměpisných souřadnic. Na tuto kapitolu navazuje návrh přípravku inerciálního navigačního systému, který je zkonstruován v programu AutoCAD Inventor. Poslední část práce popisuje realizaci přípravku, který je doplněn o model laserového gyroskopu.

Klíčová slova: Inerciální navigační systém, gyroskop, akcelerometr, stabilizovaná základna, Strap down.

Anotation

Běhal, J. *Instrument for Inertial Navigation System: Bachelor Thesis*. VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transport, Department of Air Transport, 2017, 49 p. Thesis head: Martinec, F.

The bachelor thesis deals with analysis of inertial navigation systems, design and realization of the preparation of this system. The first part of the thesis analyzes the system. Here are explained the basic principles of system function, described individual parts of the system, their principles of function and purpose. The method of obtaining geographic coordinates is described below. This chapter builds on the design of an engineering navigation system that is engineered in AutoCAD Inventor. The last part describes the realization of the product, which is complemented by a laser gyroscope model.

Key words: Inertial navigation system, gyroscope, accelerometer, stabilized base, Strap down.

Obsah

Seznam použitých zkratk	9
Úvod	11
Cíl práce	12
1 Analýza inerciálních navigačních systémů	13
1.1 Princip určování orientace a polohy v prostoru	13
1.2 Charakteristika inerciálních navigačních systémů	14
1.3 Princip činnosti	14
1.4 Senzory INS	16
1.4.1 Akcelerometry	16
1.4.2 Gyroskopy	17
1.4.3 Počítač	21
1.5 Druhy systémů INS	21
1.5.1 Systém se stabilizovanou základnou	21
1.5.1.1 Nastavení orientace základny	21
1.5.1.2 Korekce základny	22
1.5.2 Strapdown systém	24
1.5.3 Funkční rozdělení systému	25
1.6 Chyby INS	27
1.7 Nastavení systému INS	27
1.8 Zajišťování informací INS	28
1.9 Ovládací panely INS	30
2 Návrh přípravku inerciálního navigačního systému	33
2.1 Návrh základny	33
2.2 Návrh rámů	36

2.3	Návrh lože motorů	36
2.4	Návrh motorů.....	37
2.5	Návrh kostry	38
2.6	Návrh hřídelů	38
2.7	Návrh podstavy	39
2.8	3D model kompletního návrhu	40
3	Realizace přípravku INS	42
3.1	Účel	42
3.2	Realizace přípravku.....	42
3.3	Princip uchování základny ve vodorovné poloze	43
3.3.1	Velký rám.....	43
3.3.2	Malý rám.....	45
3.4	Realizace laserového gyroskopu.....	46
	Závěr	47
	Seznam použité literatury	48
	Seznam použitých obrázků.....	48
	Seznam použitých tabulek.....	49
	Seznam příloh	49

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam	Český překlad
ADC	Air data computer	Aerometrická centrála
ADIRU	Air data Inertial Reference Unit	Jednotka tvořená ADR a IR
ADIRS	Air data Inertial Reference System	Soustava jednotek ADIRU
ADM	Air data module	Převodník aerometrických údajů
ADR	Air data reference	Hodnoty aerometrických údajů
AHRS	Altitude and heading reference system	Jednotka počítající polohu
ATT	Attitude	Zeměpisná šířka
ALIGN	Alignment	Zarovnání
BATT	Battery	Baterie
CDU	Control display unit	Kontrolní zobrazovací jednotka
DA	Drift angle	Úhel snosu
DIST	Distance	Vzdálenost
DSR TRK	Desired track	Zeměpisný traťový úhel
GLONASS	Global Navigation Satellite System	Globální družicový polohový systém
GPS	global position system	Globální polohový systém
GS	Ground speed	Traťová rychlost
HDG	Heading	Kurz
IMU	Inertial measurement Unit	Inerciální měřicí jednotka
INS	Inertial navigation system	Inerciální navigační systém
IR	Inertial Reference	Inerciální reference
IRS	Inerciální referenční systém	Inerciální referenční systém
MCDU	Multi Control Display Unit	Multifunkční kontrolní zobrazovací displej
MSU	Mode selector unit	Volič módu
NDB	Non directional beacon	Nesměrový maják
PFD	Primary Flight Display	Primární zobrazovací displej
POS	Position	Pozice
REF	Reference	Reference
STBY	Standby	Pohotovost
STS	Stabilization track status	Status při vyrovnávání základny před letem
TEST	Test	Testování
TIME	Time	Čas
TK	Track	Zeměpisný traťový úhel
TKE	Track angle error	Odchylka od trati
VOR	VHF Omnidirectional Radio Range	VKV všesměrový radiomaják



WAR	Warning	Varování
WIND	Wind	Vítr
WPT	Waypoint	Traťový bod
XTK	Cross track distance	Boční odchylka od trati

Úvod

Navigace je souhrn postupů sloužících k určování polohy, orientace a hledání cesty k cíli. Počátky navigace sahají až do pravěku, kde jeskynní lidé ryli do skály jednoduché mapy, vedoucí například k ulovené potravě. K většímu rozvoji došlo ve starověku a středověku s rozvojem mořeplavby, ať už se jednalo o vojenskou, obchodní nebo objevitelskou plavbu. Při těchto plavbách se využívala navigace podle hvězd a postupně se začal rozšiřovat vynález starověké Číny, magnetický kompas. Dále se také rozvíjela tvorba map. Dalším milníkem byl vznik letecké přepravy, kde z důvodu bezpečnosti a efektivnosti vznikl požadavek na spolehlivější a přesnější navigaci. To byl impulz ke vzniku nových technologií. Například systém OMEGA, který umožnil přelety Spojeneckých bombardérů do Velké Británie během druhé světové války. Dále docházelo k rozvoji radionavigačních prostředků typu VOR, NDB, DME a dalších. V současné době se nejčastěji používají satelitní systémy GPS nebo GLONASS. GPS navigace našla uplatnění nejen v letectví, ale i ve stavebnictví, zemědělství a dalších oborech. Všechny uvedené systémy potřebují pozemní vysílače (u GPS družice na oběžné dráze Země) a palubní přijímače. Pokud chceme k navigaci použít autonomní systém, který pracuje samostatně bez pozemního vysílače využíváme inerciálních navigačních systémů (INS). Těmito systémy se budu v práci zabývat. INS využívají signály senzorů, které měří zrychlení a úhlovou rychlost ve všech zeměpisných směrech. Jako senzory tohoto systému slouží akcelerometry a gyroskopy (setrvačníky). Existuje několik druhů těchto systémů, které se liší konstrukčním uspořádáním a použitými druhy senzorů. V prvních systémech byly použity plovákové gyroskopy a pružinové akcelerometry, ale díky technickému rozvoji se dnes využívají spolehlivější a přesnější senzory využívající technologii laseru a optiky. INS ve spolupráci s ostatními navigačními prostředky např. GPS vytváří velice přesný a spolehlivý systém navigace, který usnadňuje pilotům navigaci během letu a výrazným podílem se podílí na zvýšení bezpečnosti a efektivity letecké dopravy.

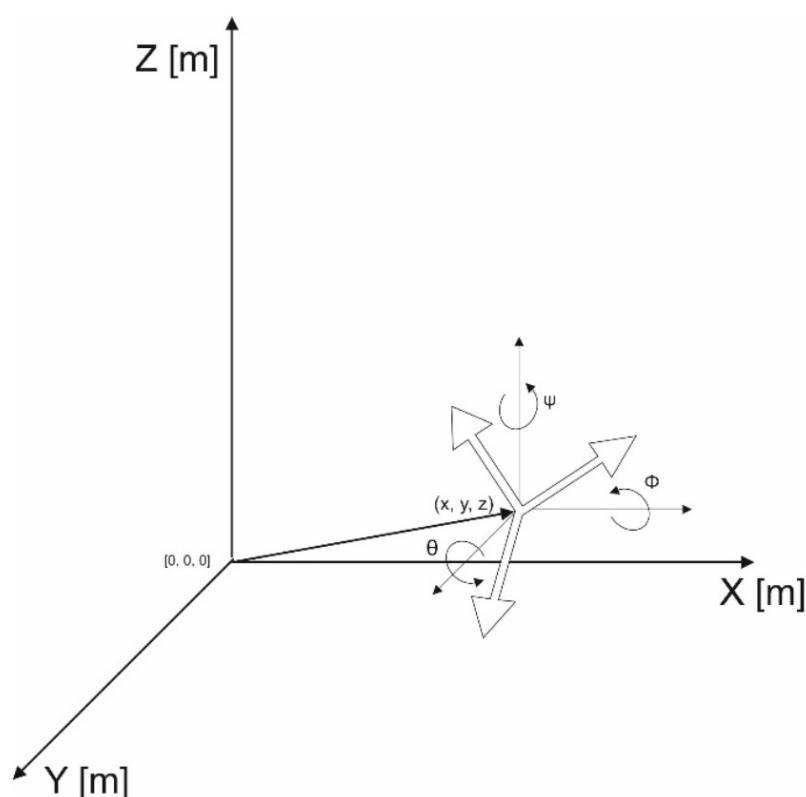
Cíl práce

Cílem první části bakalářské práce je analyzovat inerciální navigační systémy, rozdělit jednotlivé druhy a popsat základní principy jejich činnosti. Praktická část práce je zaměřena na návrh přípravku inerciálního navigačního systému v konstruktérském programu Auto CAD Inventor, který má za účel znázornit základní principy funkce inerciálního navigačního systému. Poslední část práce popisuje realizaci tohoto přípravku za použití metod třískového obrábění, jako je vrtání a hoblování. Dále se využívá metod spojování materiálu za použití lepení, šroubových a kolíkových spojů.

1 Analýza inerciálních navigačních systémů

1.1 Princip určování orientace a polohy v prostoru

Navigační systémy poskytují data orientace a pozice navigovaného objektu (NO) ve vztažné soustavě. Orientace je určena třídímní vektorem polohových úhlů rotace okolo os vztažné soustavy (θ – zatačení, φ – klopení, ψ bočení). Pozice je určena třídimenzionálním vektorem (X, Y, Z) a rychlost vektorem (V_x, V_y, V_z). Znázornění vektorů orientace a pozice je vidět na Obr. 1.



Obrázek 1 - Příklad orientace a pozice v referenční vztažné soustavě [3]

Výpočet pozice, orientace a rychlosti (navigačních dat) navigovaného objektu je nejčastěji založen na známých počátečních navigačních datech v referenční soustavě. Následně jsou pozice a orientace korigovány na základě měření zrychlení a úhlových rychlostí. Měření jsou prováděna pomocí tříosých inerciálních senzorů. Jsou to senzory zrychlení (akcelerometry) a senzory úhlových rychlostí (gyroskopy). Tyto senzory společně tvoří tzv. inerciální měřicí jednotku (Intertial measurement Unit - IMU).

Navigační systémy, které využívají tento princip výpočtu pozice a orientace se nazývají inerciální navigační systémy (inertial navigation system – INS) [3].

1.2 Charakteristika inerciálních navigačních systémů

Inerciální navigační systém je jediný autonomní navigační systém, který je v letectví používán. Jeho velkou výhodou oproti ostatním systémům je nezávislost na pozemních vysílačích, čímž je zabráněno vzniku chyb, spojených například s odrazem radiových vln a magnetickým polem Země. Systém funguje na principu pohybu od referenčního bodu a to znamená, že pro správnou funkci systému musí být před letem přesně definováno místo vzletu, trať letu a místo přistání.

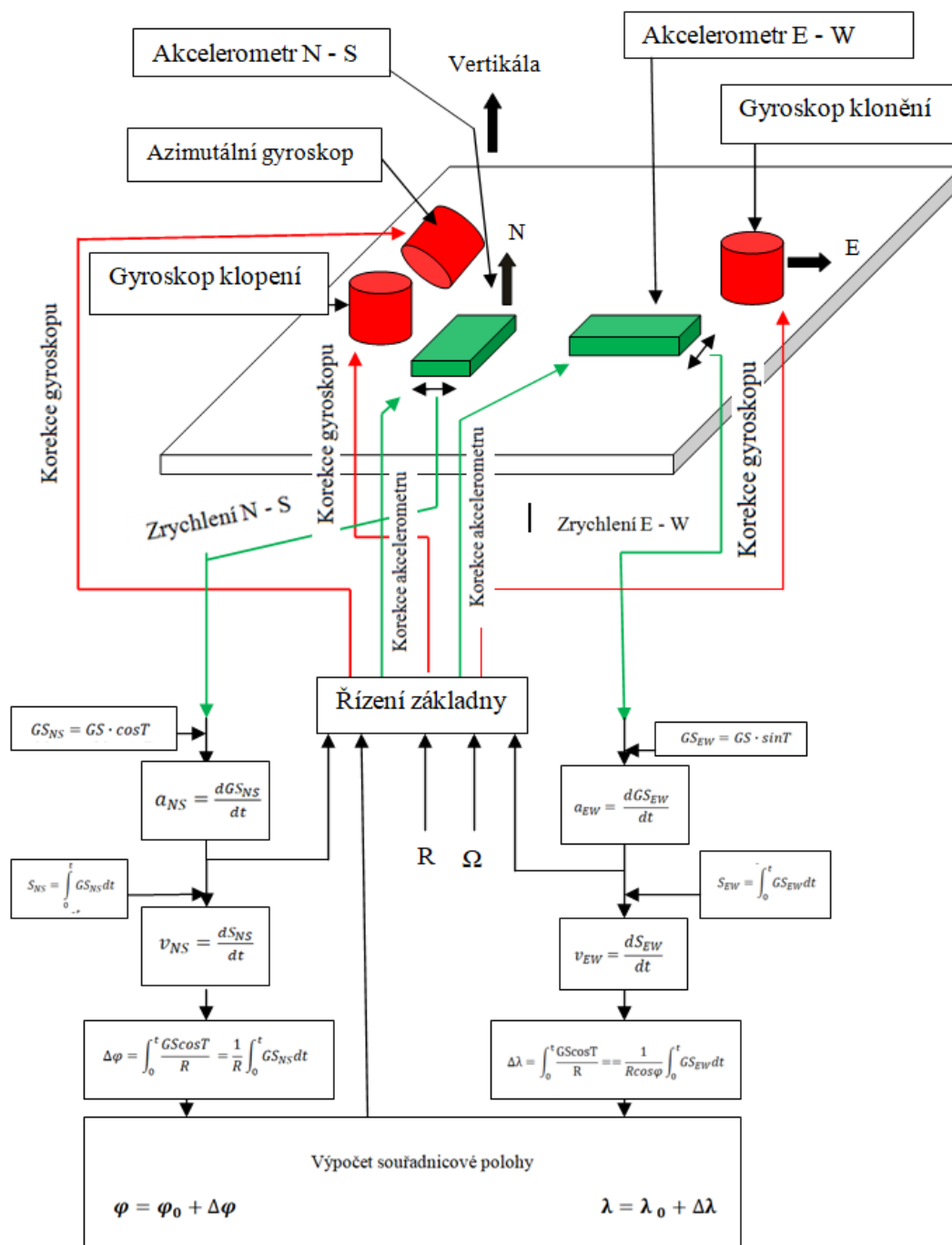
1.3 Princip činnosti

Princip činnosti INS je založen na Newtonově zákoně síly, které udává závislost mezi silou F , působící na těleso o hmotnosti m a jeho zrychlením a vzhledem k inerciálnímu prostoru.

$$F=m \cdot a$$

Rychlost letadla a poloha se určují od referenčního bodu pomocí měření zrychlení a úhlových rychlostí letadla vzhledem k zemi. Tyto veličiny jsou získávány z akcelerometrů a gyroskopů. Inerciální systém je založen na integraci akcelerace, z níž se vyhodnocuje rychlost a vzdálenost. Protože akcelerace je vektor, dává systém polohu dle os X a Y vůči počátečním souřadnicím. Systém též vyhodnocuje vzdálenost a směr k místu určení nebo traťovému bodu a odchylku od trati [2].

Na obrázku č. 2 je zobrazen základní princip získávání informací o pohybu letadla a přeměna těchto informací na zeměpisné souřadnice. Signály získané z gyroskopů a akcelerometrů putují do počítače, kde se matematicky mění na zeměpisné souřadnice, které jsou zobrazovány pilotovi. Podrobný popis senzorů je uveden v kapitole 1.4.



Obrázek 2 - Princip získávání informací o poloze ze senzorů

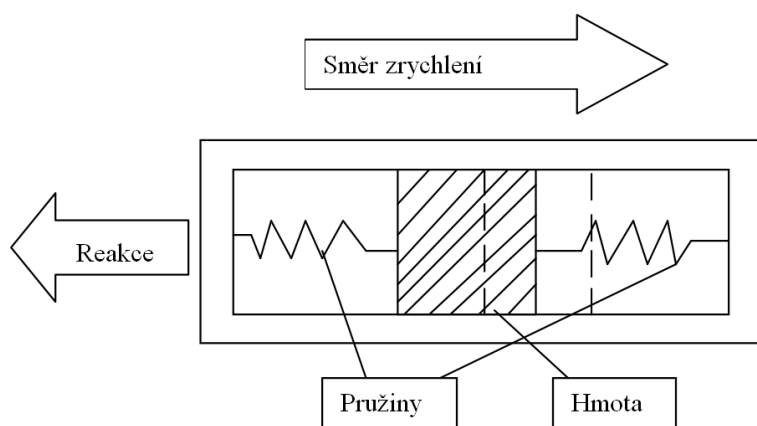
GS - traťová rychlost
T - zeměpisný traťový úhel
 GS_{EW} - traťová rychlost ve směru východ - západ
 GS_{NS} - traťová rychlost ve směru sever - jih
 a_N - zrychlení ve směru sever - jih
 a_E - zrychlení ve směru východ - západ
t - čas
 S_{NS} - dráha ve směru osy sever - jih
 S_{EW} - dráha ve směru východ - západ
 GS_{NS} - složka traťové rychlosti ve směru sever - jih
 GS_{EW} - složka traťové rychlosti ve směru východ - západ
 v_N - rychlost ve směru sever - jih
 v_E - rychlost ve směru východ - západ
R - poloměr Země
 φ - zeměpisná šířka
 $\Delta\varphi$ - změna zeměpisné šířky
 λ - zeměpisná délka
 $\Delta\lambda$ - změna zeměpisné délky
 φ_0 - referenční zeměpisná šířka
 λ_0 - referenční zeměpisná délka

1.4 Senzory INS

Jak už bylo v předchozí kapitole řečeno, určení přesné polohy letedla od referenčního bodu je realizováno pomocí senzorů úhlových rychlostí (gyroskopů) a senzorů zrychlení (akcelerometrů). Signály z těchto senzorů jsou v počítači matematicky upraveny viz. obrázek č. 1. Upravené signály jsou přepočítány na zeměpisné souřadnice a zobrazeny na zobrazovacím panelu CDU. Od prvních verzí INS do dnešní doby bylo za účelem zpřesnění systému vyvinuto několik druhů senzorů. Tato kapitola se zabývá jejich rozdělením a popsáním základních principů funkce.

1.4.1 Akcelerometry

Jsou to základní součástky systému, od jejich snímaných hodnot se odvíjí činnost ostatních součástí. Slouží k měření zrychlení. V systému se nachází dva. Jsou umístěné na stabilizované základně tak, že leží v jedné rovině tak, že jsou jejich osy citlivosti vzájemně kolmé. Jeden akcelerometr měří zrychlení sever - jih (N - S akcelerometr) a druhý východ - západ (E - W akcelerometr).



Obrázek 3 - Akcelerometr

Základní parametry Akcelerometrů pro INS se stabilizovanou základnou:

- vyšší přesnost než 10^{-5} g
- pracovní rozsah ± 2 g

V minulosti byly používány plovákové akcelerometry. U tohoto typu je plovák v kapalině, která jej nadlehčuje a současně tlumí jeho pohyb. Měřicí osou plováku je osa otáčení. Hmota v plováku je nesymetricky rozložena. To způsobuje, že se při působení síly natočí. Výchylka je měřena indukčním snímačem, jehož signál je výstupem z akcelerometru a zároveň ovládá servomechanismy, které vracejí plovák do střední polohy.

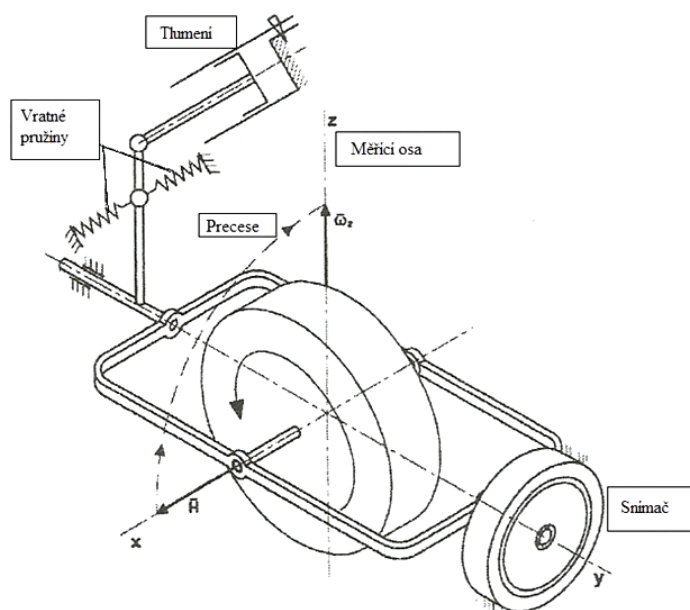
V dnešní době se používají suché akcelerometry, které fungují jako kyvadlo se silovou kompenzací. Při působení zrychlení ve směru osy citlivosti akcelerometru, vlivem setrvačnosti se kyvadélko vychýlí z nulové polohy. Signál ze snímacího členu je poslán do zesilovače a proud ze zesilovače je použit v kompenzačních cívkách, které vracejí akcelerátor do původní polohy. Velikost výstupního proudu ze zesilovače je funkcí akcelerace a je použita, jako výstup z akcelerometru. Tento druh akcelerometru se vyznačuje citlivostí 10^{-6} g a rozsahem 10 g [1].

1.4.2 Gyroskopy

Gyroskopy nebo – li setrvačníky jsou to snímače úhlové rychlosti se dvěma stupni volnosti. Aby bylo dosaženo co nejpresnější hodnoty snímaného signálu, jejich hodnoty se buďto derivují nebo integrují.

V minulosti se používali derivační plovákové setrvačníky. Setrvačník je uložen ve válcovém plováku naplněném kapalinou, který zmenšuje síly na ložiscích. Vzniká zde směrový moment, který je způsoben momentovým motorem a musí být kompenzován. Výhodou těchto setrvačníků je dobrá odolnost proti vibracím.

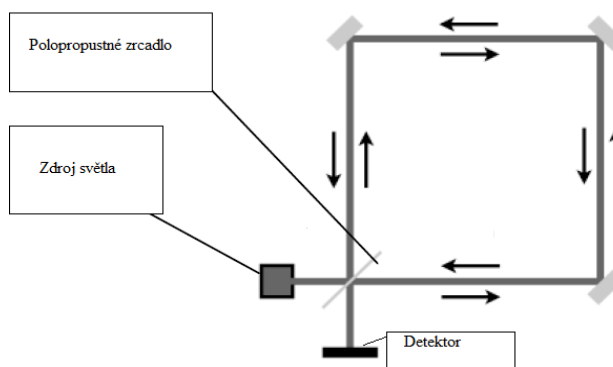
V současné době se využívají optické setrvačníky s vláknovou optikou nebo laserové rezonanční setrvačníky.



Obrázek 4 - Princip gyroskopu

Optické setrvačníky pracují na takzvaném Sagnacově jevu. Ten je způsoben relativistickými vlastnostmi světla. Pokud dva paprsky světla rotují po uzavřené kruhové dráze a ta se zároveň otáčí kolem osy kolmé k této dráze, urazí jeden z paprsků ve skutečnosti za stejný čas větší vzdálenost. Paprsek který obíhá ve směru rotace systému, urazí menší vzdálenost. Paprsek, který obíhá ve směru rotace systému, urazí menší vzdálenost než paprsek rotující proti směru otáčení. Protože je rychlost světla konstantní, projeví se tento rozdíl ve vzdálenostech jako změna frekvence světelného paprsku. Rozdíl ve frekvencích paprsků je potom úměrný úhlové rychlosti rotace gyroskopu. Základem gyroskopu s vláknovou optikou je cívka s optickým vláknem. Její rozměry a počet závitů závisí na požadované přesnosti. Zdrojem světla je luminiscenční dioda umístěná mimo

cívkou. V optickém děliči se paprsky rozdělují tak, aby probíhali cívkou proti sobě. Pro projití cívkou jsou vedeny do detektoru. Pokud se systém neotáčí, přijdou paprsky do detektoru se stejnou fází a díky vzájemné interferenci se zesilují. Výstupní světlo tak dosahuje maximální intenzity. Pokud se systém otáčí, vznikne na přístroji mezi paprsky rozdíl, který snižuje na detektoru výstupní intenzitu světla. Rozdíl ve vstupní a výstupní intenzitě světla je potom funkcí úhlové rychlosti otáčení systému. Neodpovídá však nic o směru rotace. Proto se přidává ještě posuzovač fáze. Díky němu je rozdíl v paprscích již v klidovém stavu. Intenzita světla na výstupu potom při jednom směru otáčení vzroste a při opačné rotaci poklesne [1].

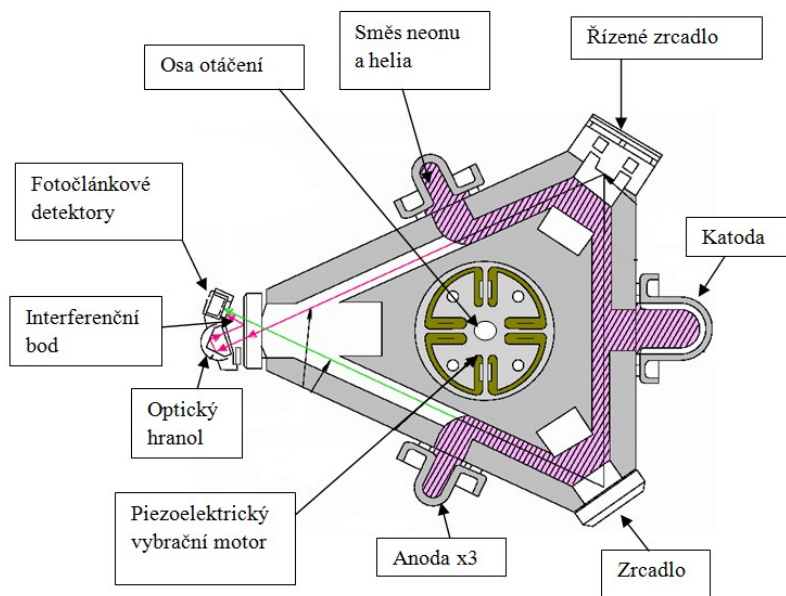


Obrázek 5 - Princip optického gyroskopu

Laserové rezonanční setrvačníky se skládají ze tří zrcadel, která zabezpečují rotační dráhu dvěma paprskům, které jsou generovány a posílány po trojúhelníkové dráze v opačných směrech. Paprsky procházejí malými tunely vyhloubenými paralelně k obvodu trojúhelníkového bloku vyrobeného z keramického skla s odrazovými zrcadly umístěnými v rozích. Kanálky jsou naplněny směsí helia a neonu. Laserové paprsky jsou vyvolány vysokým napětím mezi anodou a katodou (1500V). Vyrobený laserový paprsek je paprsek spojitého světla různých frekvencí. Světlo se odráží mezi zrcadly a paprsky, které mají jinou frekvenci vlnění, než je zapotřebí, jsou absorbovány v zrcadlech. Pokud trojúhelníková cesta přístroje nerotuje, paprsky rotují v opačném směru stejnou rychlostí - rychlostí světla. Paprsky tak mají stejnou frekvenci a v detektoru se nerozlišují. Pokud je však přístroj v pohybu, jeden z paprsků musí na oběh trojúhelníkové cesty urazit větší vzdálenost a druhý menší. Protože rychlost světla je konstantní, projeví se tento rozdíl

délek cest světla jako rozdíl frekvencí, který se projeví v detektoru interference. Základním požadavkem je, aby délka cesty paprsku byla celočíselným násobkem jeho vlnové délky. Proto je jedno ze zrcadel nastavitelné - je uloženo na podložce z piezoelektrického krystalu. Kompenzace délky optické cesty se řídí napětím na krystalu. Další je částečně propustné, aby se laserové světlo dostalo k fotobuňce. Součástí druhého zrcadla je optický hranol, který mění směr paprsků tak, aby je nasměroval do detektoru, kde vzájemně interferují a vytvářejí interferenční proužky, které jsou snímány fotodiodami. Náhodný únik, který je u normálních gyroskopů způsoben nedokonalostmi ve vyvážení systému a třením v ložiscích, je zde způsoben nedokonalostmi uložení zrcadel a nedokonalostmi jejich krycích vrstev. Přesnost systému závisí na délce cesty paprsku. Delší dráha paprsku umožňuje vyšší přesnost. Pouze malé procentuální prodloužení dráhy paprsku má za následek podstatné zlepšení přesnosti.

Největším problémem je tzv. "lock in" efekt - necitlivost systému při nízkých otáčkách. Jejím zdrojem je šum, způsobený rozptylem paprsků na zrcadlech. Tento jev se odstraňuje vibračním motorem, který je namontován tak, že vibruje gyroskopem okolo jeho vstupní osy [1].



Obrázek 6 - Princip laserového gyroskopu

1.4.3 Počítač

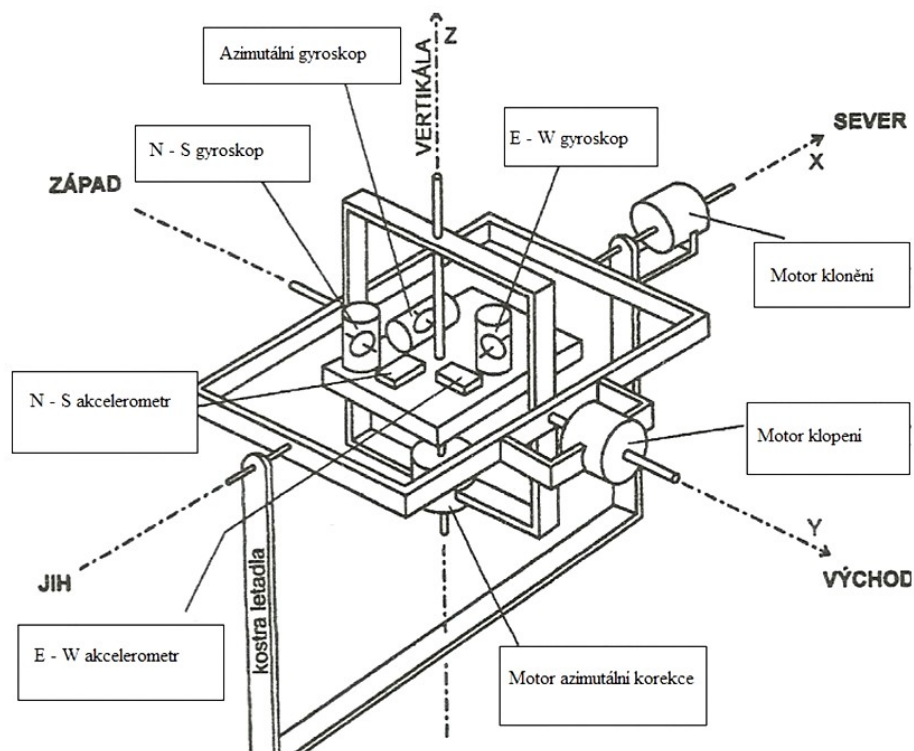
Počítač přijímá signál od senzorů, matematicky provádí korekce, poté upravený signál přepočítá na zeměpisné souřadnice, které předává zobrazovací jednotce. Matematické vztahy pro jednotlivé výpočty jsou popsány v tabulce č. 1, 2, 3.

1.5 Druhy systémů INS

Existují dva základní druhy INS. Systém se stabilizovanou základnou a Strapdown system.

1.5.1 Systém se stabilizovanou základnou

Stabilizovaná základna je plošina nebo - li platforma uložená v kardanově závěsu a jsou na ní tři integrační gyroskopy se vzájemně kolmými osami a akcelerometry. Ukázka systému se stabilizovanou základnou je na obrázku číslo 2.



Obrázek 7 - Stabilizovaná základny

1.5.1.1 Nastavení orientace základny

- Schulerovo kyvadlo

Někdy se uvádí, že základna je laděna podle Schulera. To má souvislost s principem schulerova kyvadla. Schulerovo kyvadlo je kyvadlo, které má těžiště ve středu Země, jeho

délka se rovná poloměru Země a bod závěsu je na povrchu Země. Zvláštností tohoto kyvadla je, pokud je závěsný bod kyvadla pevný a kyvadlo se uvede do pohybu, pak perioda kyvu kyvadla bude 84,4 minuty. Stabilizace pomocí gyroskopů způsobuje, že základna se chová jako Schulerovo kyvadlo.

Stabilizovanou základnu můžeme nastavit dvěma různými způsoby.

- **Základna orientovaná k zeměpisnému severu**

Tento způsob nastavení je limitován zeměpisnou šířkou. Se zvyšující se zeměpisnou šířkou rotace okolo vertikální osy tohoto systému stoupá a to zvyšují chyby systému. Z tohoto důvodu se tento způsob orientace základny v dnešní době nepoužívá.

- **Wander Azimuth systém nastavení základny**

Základna je vyrovnávána do horizontu stejně jako základna orientovaná k severu s tím rozdílem, že nastavení horizontálních akcelerometrů je určováno matematicky na základě výstupu z gyroskopů s horizontálně orientovanými osami citlivosti. Tento systém je použitelný i ve velkých zeměpisných šířkách [1].

1.5.1.2 Korekce základny

- **Korekce gyroskopů**

Aby vertikální osa základny směřovala stále do středu Země a osy akcelerometrů byly rovnoběžné s osami souřadného systému Země, musejí být do systému stabilizace zaváděny opravy na otáčení Země a na let okolo ní. Země se otáčí okolo své osy rychlostí $\Omega = 15,04^\circ/\text{hod}$. Aby byla základna vodorovná, musí být korigována na otáčení Země a otáčet se tedy okolo horizontální osy (N - S) rychlostí

$$\omega_{horiz} = \Omega \cos \varphi$$

a aby byla orientovaná neustále k zeměpisnému severu, musí se zavádět oprava kolem vertikální osy rychlostí

$$\omega_{vert} = \Omega \sin \varphi$$

Podobně se do základny zavádí korekce na let okolo Země a to na hodnoty veličin X a Y respektive N a E zde uvažujeme jako kladné [1].

Tabulka 1 - Korekce gyroskopů

$\omega_x = \frac{v_y}{R}$	\longrightarrow	$\omega_{NS} = \frac{v_E}{R}$
$\omega_y = -\frac{v_x}{R}$	\longrightarrow	$\omega_{EW} = -\frac{v_N}{R}$
$\omega_z = \frac{v_y}{R} \tan \varphi$	\longrightarrow	$\omega_{VERT} = \frac{v_E}{R} \tan \varphi$

v_x respektive v_E - rychlost letu do východního směru,

v_y respektive v_N - rychlost letu do severního směru,

R - poloměr Země,

φ - zeměpisná šířka

- **Korekce akcelerometrů**

Vliv coriolisovy síly

Tato síla je způsobena rotací Země okolo své osy a ovlivňuje výstup jak z N - S tak E - W akcelerometrů.

Vliv dostředivého zrychlení

Na letadlo, které letí konstantní rychlostí po kružnici působí konstantní dostředivé zrychlení. To ovlivňuje akcelerometry a musí se korigovat.

V níže uvedené tabulce jsou uvedeny základní matematické vztahy pro korekce akcelerometrů z jednotlivých příčin [1].

Tabulka 2 - Korekce senzorů

Osa	Gyroskopy		Akcelerometry	
	Rotace Země	Let okolo Země	Dostředivá síla	Coriolisova síla
N - E (severní)	$\cos \varphi$	$\frac{v_E}{R}$	$-\frac{v_E^2 \tan \varphi}{R}$	$-2\Omega v_E \sin \varphi$
E - W (východní)	Žádná oprava	$-\frac{v_N}{R}$	$\frac{v_E v_N \tan \varphi}{R}$	$2\Omega v_N \sin \varphi$
Azimutální (vertikální)	$\Omega \sin \varphi$	$\frac{v_E}{R} \tan \varphi$	$\frac{v_E^2 + v_N^2}{R}$	$2\Omega v_E \cos \varphi$

1.5.2 Strapdown systém

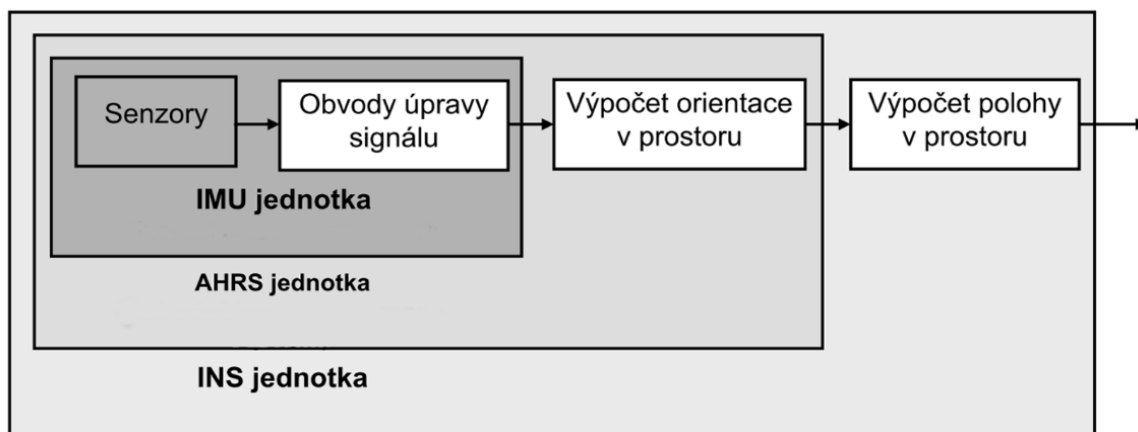
Tento systém se vyznačuje tím, že senzory jsou připevněny na navigovaný objekt jejich osy jsou v jedné rovině s osou navigovaného objektu, tedy letadla. Jelikož je systém připevněn k letadlu, přenáší se na něj vibrace způsobené pohybem letadla, chodem motorů a tak podobně. Proto je tento systém k letadlu připevněn anty - vibračním uspořádáním, které tyto vibrace dostatečně tlumí. Systém se skládá se ze skupiny akcelermetrů, senzorů úhlových rychlostí a výpočetních jednotek. Tuto skupinu senzorů lze rozdělit funkčních bloků:

- blok úpravy signálu
- blok počítače pro výpočet orientace
- blok počítače pro výpočet polohy v prostoru

Jestliže jsou výstupy ze senzorů analogové, tak blok úpravy signálů musí obsahovat analogovo číslicový převodník. Který převádí analogový signál do číslicové polohy. V tomto případě je signál upravován pomocí číslicových filtrů a výpočetních korekcí. Používá se Kalmanova filtrace, která je založena na využití externích informací o pohybu letadla k provedení korekce signálu. Musí se také korigovat nelinearity senzorů a tak dále.

Senzory jsou nakonfigurovány, jako tříosý pravoúhlý systém, v jehož každé ose je jeden akcelerometr a jeden senzor pravoúhlé rychlosti. Tento systém je totožný s hlavními

osami letadla. Měří úhlové rychlosti a zrychlení ve všech směrech 3D prostoru. Dále se tento systém dělí z hlediska výstupních dat.



Obrázek 8 - Blokové uspořádání systému

- **Inerciální řídicí jednotka (IMU)**

Poskytuje informaci o zrychlení a úhlové rychlosti bez zarovnání do referenční soustavy.

- **Jednotka počítající polohu (AHRS)**

Je to rozšířená IMU. Navíc poskytuje snímané hodnoty polohových úhlů a kurzu (θ , φ , ψ). Jeho součástí je také senzor magnetické indukce. Systém spolupracuje s radionavigačními prostředky VOR a DME, aerometrickou ústřednou a systémem pro měření magnetického pole Země. Funkční schéma systému AHRS je na obrázku číslo 7.

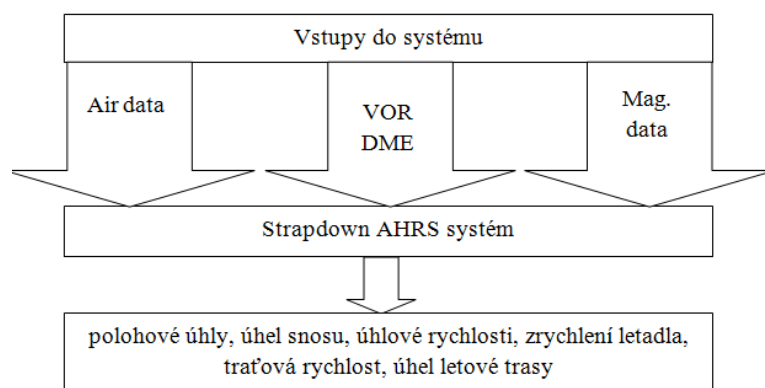
- **Inerciální navigační systém (INS)**

Je spojení všech výše uvedených bloků. Poskytují inerciální data, data pozice, data polohových úhlů a kurzu. Jak už z charakteristiky INS víme, pro navigaci tento systém potřebuje znát počáteční pozici a souřadnice. Ty většinou získává z GPS navigačního systému.

1.5.3 Funkční rozdělení systému

- **AHRS**

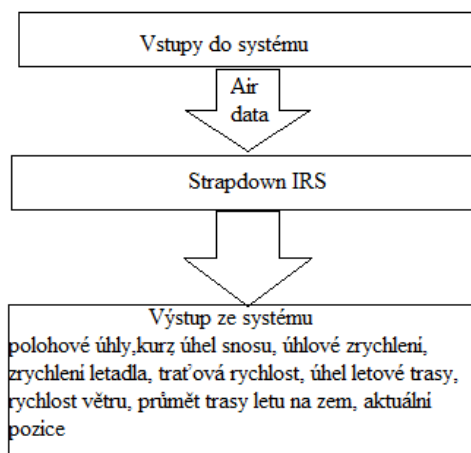
Systém poskytuje základní informace o rychlosti a orientaci v prostoru. Data získána ze systému musí být před použitím k navigaci korigována.



Obrázek 9 - Funkční schéma AHRS systému

- **IRS - Inerciální referenční systém**

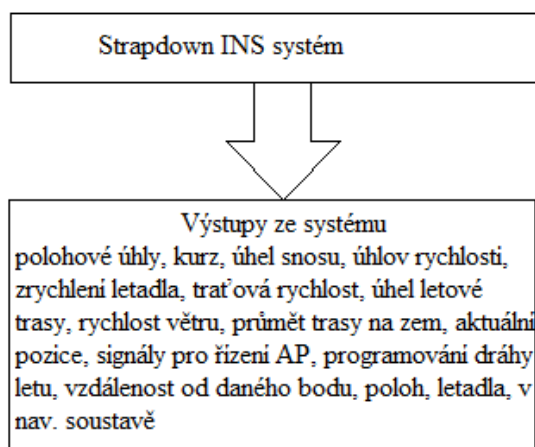
Podává informace jako AHRS a navíc dává informace o rychlosti větru, aktuální pozici letadla a průmětu trasy letu na zem. Systém spolupracuje jen s aerometrickou jednotkou.



Obrázek 10 - Funkční schéma IRS systému

- **INS**

Podává stejné informace jako IRS a navíc dává informace o poloze letadla v navigační soustavě, vzdálenosti a času ke vztažnému bodu. Umožňuje programování dráhy letu, řízení letadla autopilotem a je zcela autonomní [2].



Obrázek 11 - Funkční schéma INS systém

1.6 Chyby INS

Chyby dělíme na :

- **Ohraničené chyby - nenarůstají s časem**

Tento druh chyb roste do maxima a klesá zpět do nuly každých 84,4 minut Schulerova cyklu. Jsou způsobeny chybami akcelerometrů, integračními chybami po prvním stupni integrace atd.

- **Chyby narůstající s časem**

Tento druh chyb se dále dělí na chyby v měření zeměpisné trati, které jsou způsobeny počátečním chybným nastavením systému a driftem vertikálního gyroskopu. Další druh chyby narůstající s časem je chyba v měření vzdálenosti. Ta je způsobena nepřesnostmi gyroskopů a integračními chybami po druhém stupni integrace.

- **Další chyby metody**

Tento druh chyb je způsoben otáčením a tvarem Země.

1.7 Nastavení systému INS

Přesnost navigace podle INS je závislá na počátečním nastavením azimutu a na poloze základny. Nastavení základny je prováděno na zemi, pokud je letadlo v klidu a skládá se z několika kroků:

- **Zahřátí systému**

Kapaliny obsažené v systému se musí zahřát na provozní teplotu. To trvá 3 až 4 minuty.

- **Hrubé nastavení**

Hrubé vyvážení základny se provádí za pomoci kostry letadla jako reference. Dále se provádí nastavení základny podle dostupného zeměpisného severu. Provádí se s přesností na 1 až 2 stupně.

- **Jemné vyvážení**

Je to nastavení do vodorovné polohy pomocí akcelerometrů s přesností na 6 úhlových sekund.

- **Gyrokompasování**

Základna se nastaví do severní ho směru pomocí gyroskopů. Pokud je základna nastavena správně, gyroskop musí vykazovat nulovou úhlovou rychlost vlivem otáčení země [1].

1.8 Zajišťování informací INS

Informace o směru, a poloze letadla jsou zajišťována tříkanálovým systémem ADIRS (Air Data/inertial Reference System). Poskytuje ztrojenou informaci pro všechny funkce. Každý kanál je izolovaný a nezávislý na ostatních. Systém zobrazuje pilotovy informace pomocí displeje PFD (Primary Flight Display), ale je připojen na mnoho dalších systému, například odpovídač. ADIRS získává informace z následujících systémů.

- **Tři ADIRU (Air Data and Inertial Reference Unit)**

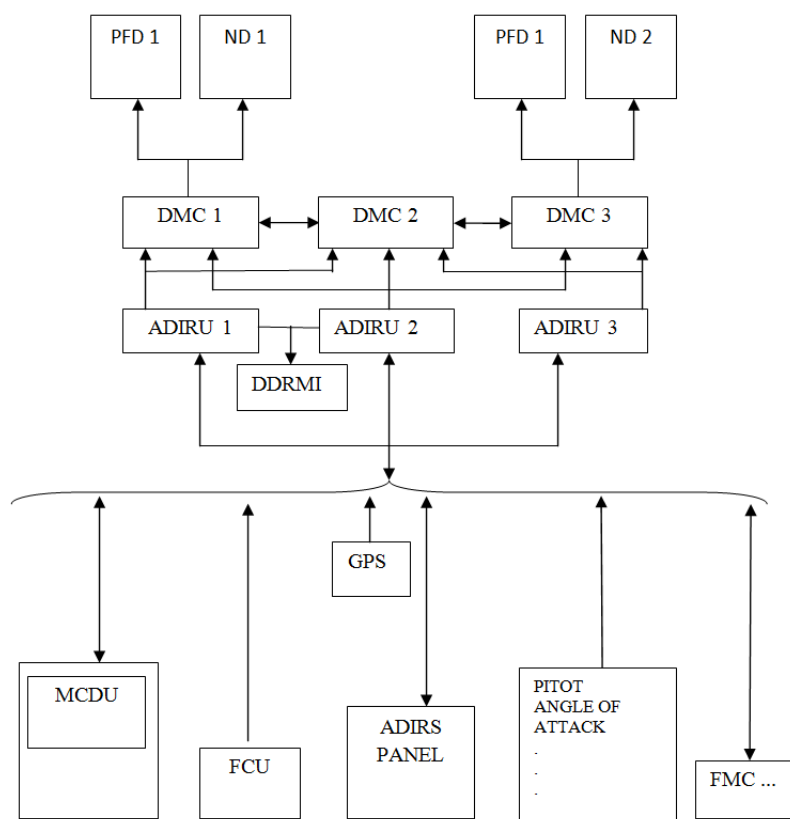
Ten je složený ze dvou částí:

- ADR (Air Data Reference) - poskytuje barometrickou výšku, vzdušnou rychlost, machovo číslo, úhel náběhu, teplotu a varování před překročení maximální rychlosti.

- IR (Inertial Reference) - poskytuje informace o poloze, trajektorii letu, letěnou trať, směr, zrychlení, úhlové rychlosti, traťovou rychlost a pozici letadla.
 - **Čtyři typy vzdušných senzorů**
 - tři pitotovy trubice
 - šest vstupů statického tlaku
 - dva snímače teploty
 - tři snímače úhlu náběhu
 - **Osm ADM (Air Data Module)**
- Dvě GPS

GPS jsou připojené k IR a slouží k určení pozice.

ADIRS lze ovládat přes CDU (Control unit display), ale ta se nevyužívá, protože jedinou akcí kterou systém vyžaduje je ustavení základen a to lze provést přes MCDU (Multi Control Display Unit). V případě poruchy lze jednoho ze tří IR, je možné na CDU defektní jednotku přepnout do stavu ATT (Attitude) pokud ztratila schopnost navigovat a může podávat informace o poloze nebo je možné ji úplně vypnout. Za normálních okolností poskytuje informace kapitánovi ADR1/IR1 a kopilotovi ADR2/IR2. Při selhání je možné na centrálním panelu přepnout zdroj informací na ADR3/IR3 [1].



Obrázek 12 - Schéma ADIRS

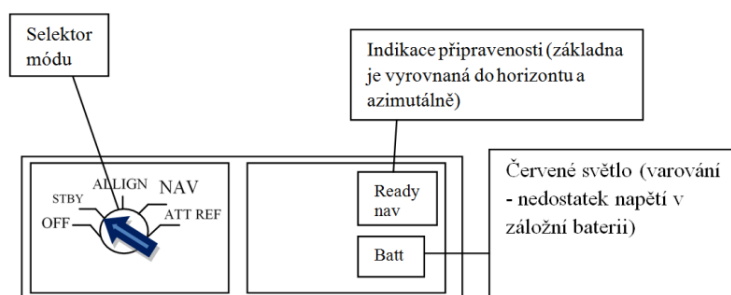
1.9 Ovládací panely INS

INS se ovládají pomocí dvou základních panelů:

- Panel volení módu INS (MSU - Mode selector unit)
- Panel zobrazení informace i INS (CDU)

Polohy přepínače INS - MSU:

- STBY - Do všech součástí systému je dodáván elektrický proud. V tomto módu se nastavuje počáteční poloha (zeměpisné souřadnice stojánky, kde je letadlo přistaveno).
- ALIGN - Základna je vyvážená a nastavená k zeměpisnému severu.
- NAV - Provozní mód základny. Při tomto nastavení jsou aplikovány korekce akcelerometrů a gyroskopů.
- ATT REF - Používá se, pokud není systém schopen určit zeměpisnou polohu.



Obrázek 13 - Volič módu

Popis panelu zobrazení informace:

- BATT - Kontrolka, která označuje využití záložní baterie, při výpadku proudu.
- HOLD - Používá se k zpřesnění polohy, při přelétávání fixu.

Pomocí ovladače zobrazení se dají zobrazit následující informace:

- TK/GS - Současný zeměpisný traťový úhel, traťová rychlost.
- HDG/DA - Zeměpisný kurz letadla, úhel snosu.
- XTK/TKE - Boční odchylka od trati, úhlová odchylka od současného letu k naletění následujícího traťového úhlu.
- POS - Současná poloha v zeměpisných souřadnicích.
- WPT - Zeměpisné souřadnice příslušného traťového bodu.
- DIST/TIME - Vzdálenost a čas k příštím traťovému bodu.
- WIND - Směr a rychlost větru.
- DSR TRK/STS - Používaná trať letu a status při varování základny před letem.
- TEST - Test funkce panelu [1].



32

2 Návrh přípravku inerciálního navigačního systému

V této kapitole je popsán návrh přípravku (modelu) INS, který bude později zrealizován za účelem praktického znázornění základního principu funkce INS. Pro tvorbu návrhu přípravku je použit konstruktérský program Auto CAD Inventor, který je již mnoho let hlavním konstruktérským softwarem většiny světových firem zabývajících se strojírenstvím. Jak už z účelu tohoto návrhu vyplívá, cílem této kapitoly není zkonstruovat funkční INS, proto jsou komponenty obsažené v tomto systému jako jsou gyroskopy, akcelerometry, motory atd., nahrazeny jejich maketami, které mají za účel znázornit jejich četnost, rozmístění v systému a tím lépe vysvětlit jejich funkci v reálném INS.

Jednotlivé komponenty jsou barevně rozlišeny z důvodu jejich lepšího rozpoznání. Každý komponent je opatřen výkresovou dokumentací, která je z důvodu své rozsáhlosti umístěna v příloze. V práci se nachází jen výkresy hlavních komponent a celé sestavy včetně 3D modelu kompletního návrhu.

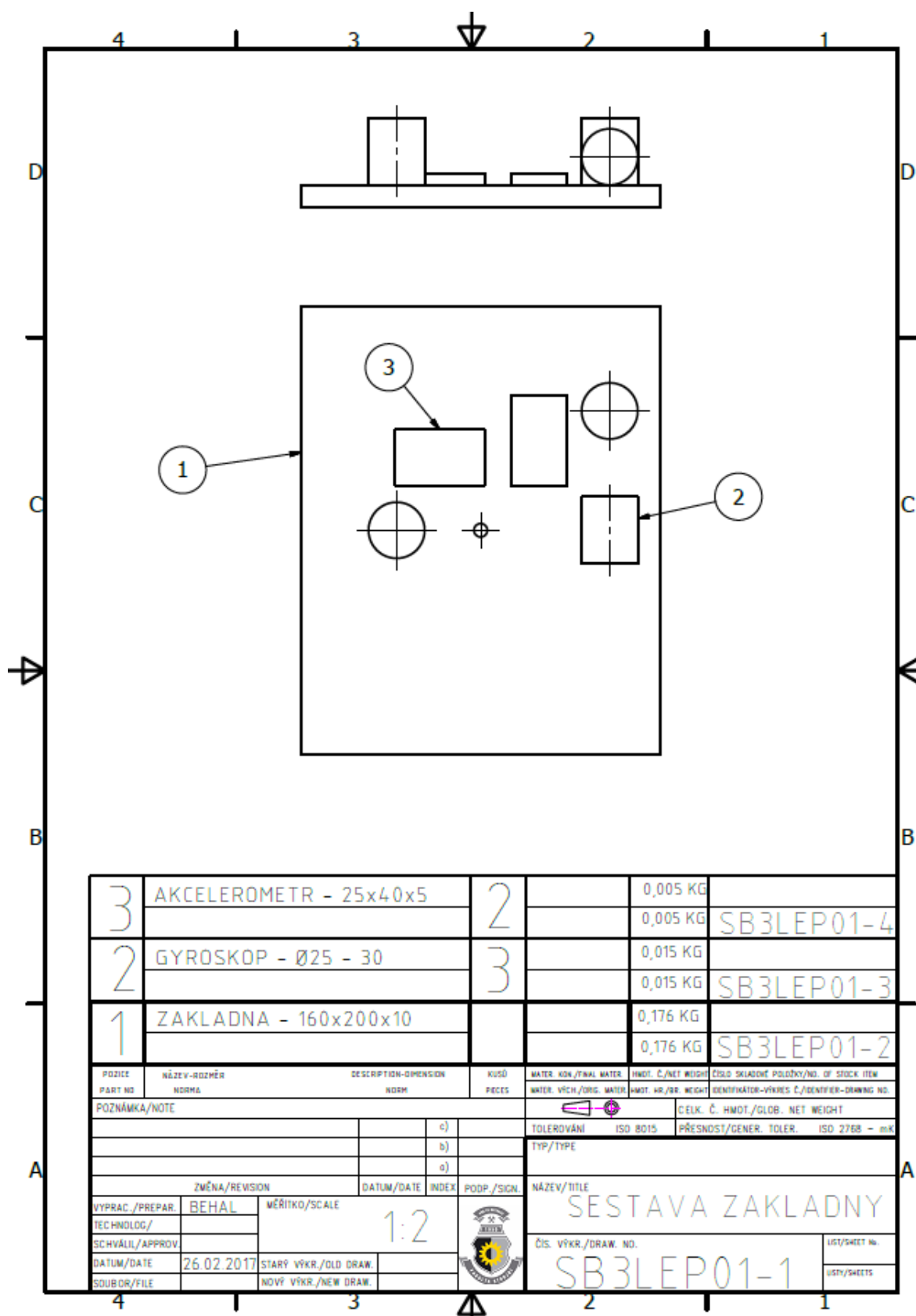
Jako vzor pro návrh byl zvolen systém se stabilizovanou základnou. Jedná se o poměrně zastaralou konstrukci s plovákovými gyroskopy a akcelerometry, ale pro vysvětlení principu funkce INS, je tento systém nejvhodnější. Tento systém je tvořen základnou, na niž jsou umístěny dva akcelerometry a tři gyroskopy. Základna je usazena v kardanovém závěsu, který tvoří dva otočné rámy, které slouží k ustavení základny a umožňují ve spolupráci s motory setrvat základně ve vodorovné poloze při klonění a klopení letadla. Dále je v systému umístěn motor klopení, klonění a azimutální motor. Motory otáčí základnou při náklonech letadla tak, aby zůstala ve vodorovné poloze. Tento systém je pomocí rámu připevněn k podstavě, která znázorňuje kostru letadla.

Cíl této kapitoly je vytvoření návrhu, který bude sloužit, jako předloha pro realizaci přípravku. Rozměry a použité materiály v návrhu se shodují s reálným přípravkem.

2.1 Návrh základny

Základna je navržena jako obdélníková dřevěná deska o délce 200 mm, šířce 160 mm a tloušťce 10 mm. Těžištěm desky je veden kruhový otvor o průměru 6 mm pro vedení hřídele azimutálního motoru. Dále jsou na základně připevněny dvě obdélníkové destičky o délce 40 mm, šířce 25 mm a tloušťce 5 mm. Tyto destičky jsou vůči sobě umístěny kolmo a znázorňují umístění akcelermetrů ve směru sever - jih a východ - západ. Akcelerometry jsou na 3D modelu znázorněny zelenou barvou, viz. obrázek č. 22. Dále se

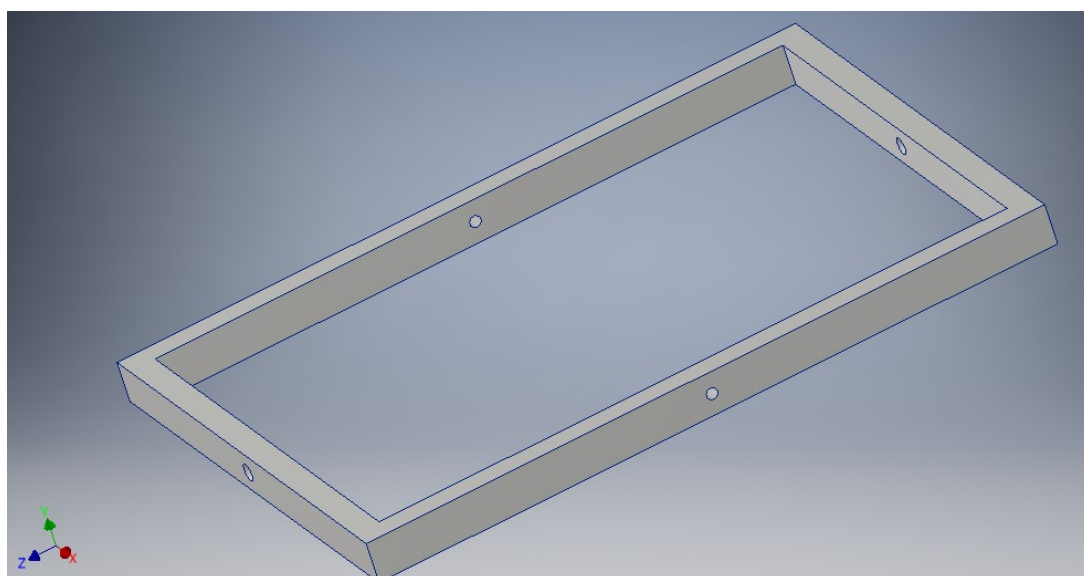
na desce nachází 3 válečky o průměru 25 mm a délce 30 mm. Tyto válečky znázorňují pouzdra, v kterých jsou umístěny gyroskopy měřící úhlovou rychlost ve směru sever - jih, východ - západ a azimutální gyroskop. Na 3D modelu jsou pouzdra gyroskopů nabarveny červenou barvou. Technické výkresy základny, pouzder gyroskopů a akcelerometrů jsou v příloze A, B, C .



Obrázek 15 - Sestava základny

2.2 Návrh rámu

V sestavě jsou dva obdélníkové rámy s tloušťkou stěny 9 mm a výškou 14 mm. Délka prvního rámu je 300 mm a šířka 210 mm. Středem každé stěny rámu je veden otvor o průměru 4 mm pro upevnění hřídelů vedoucích z motorů klopení a klonění. Druhý rám má délku 240 mm a šířku 180 mm. Středem delších stěn jsou vedeny otvory o průměru 4 mm pro upevnění hřídelů vedoucích z motorů klopení a klonění a středy kratších stěn jsou vedeny otvory o průměru 6 mm pro upevnění hřídele azimutálního motoru. Výkresy rámu jsou v příloze D a E.

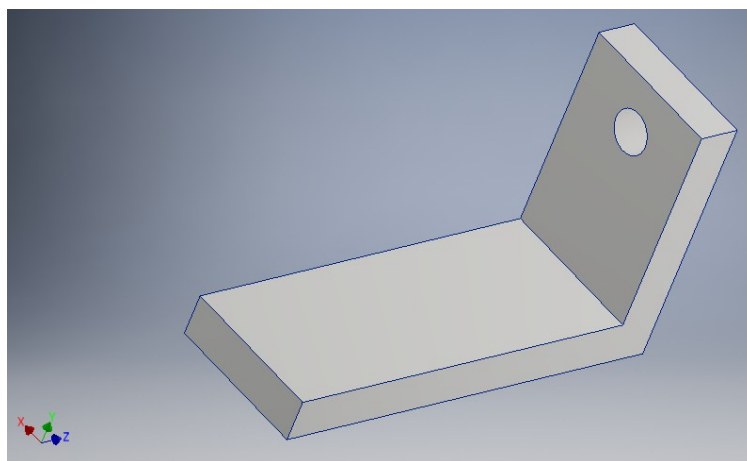


Obrázek 16 - Rám

2.3 Návrh lože motorů

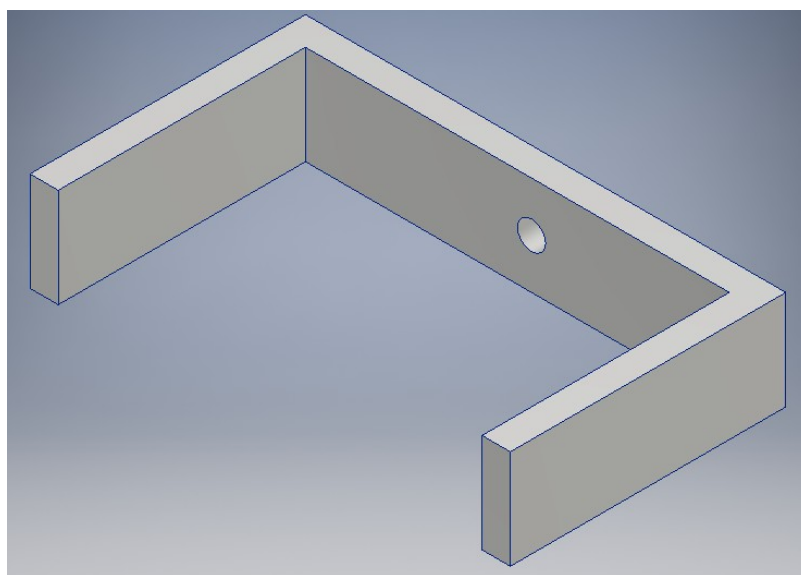
Lože motoru slouží k upevnění motoru k rámu. V 3D modelu se nachází 4 lože dvou různých typů.

První lože má tvar písmene L. Jeho delší strana měří 40 mm a kratší 24 mm. Jeho šířka je 14 mm a tloušťka 4 mm. Středem kratší strany je veden otvor o průměru 4 mm. Technický výkres tohoto lože je v příloze F. Lože je použito k uchycení motoru ke kostře.



Obrázek 17 - Motorové lože typu L

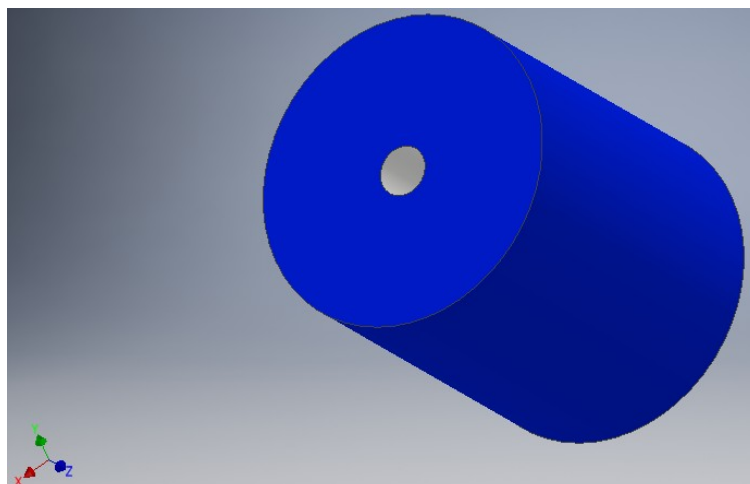
Druhý typ lože má tvar písmena U a je použito třikrát. Šířka je 14 mm a tloušťka stěny je 4 mm. Delší stěna lože měří 64 mm a jejím středem je veden otvor o průměru 4 mm u dvou a u třetího 6 mm. Délka kratších stěn je 37 mm. Výkresy loží jsou v příloze F a G.



Obrázek 18 - Motorové lože typu U

2.4 Návrh motorů

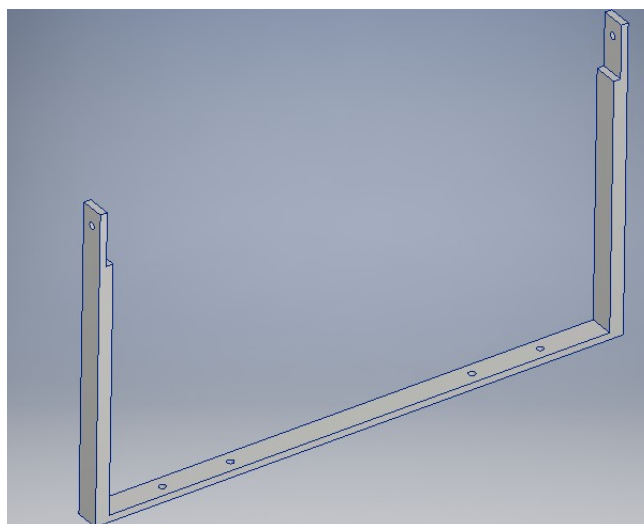
Jako makety motorů jsou navrženy válce o průměru 25 mm a délce 30 mm. Středem je veden otvor o průměru 4 mm u motoru klopení a klonění a 6 mm u azimutálního motoru. Technické výkresy maket motorů jsou v příloze H, I, J.



Obrázek 19 - Maketa motoru

2.5 Návrh kostry

Kostra je navržena jako rám ve tvaru písmena U a má za účel simulovat kostru letadla a dále slouží k uchycení celého modelu k podstavě. Jeho delší stěna je dlouhá 310 mm a je opatřena dvěma otvory o průměru 4 mm k uchycení rámu k podstavě za pomoci šroubů. Kratší stěny jsou dlouhé 180 mm a v horní části jsou opatřeny otvory průměru 4 mm, které složí k ustavení modelu do rámu za pomoci hřídelí. šířka stěn je 14 mm a tloušťka 4 mm. Technický výkres kostry je v příloze K.

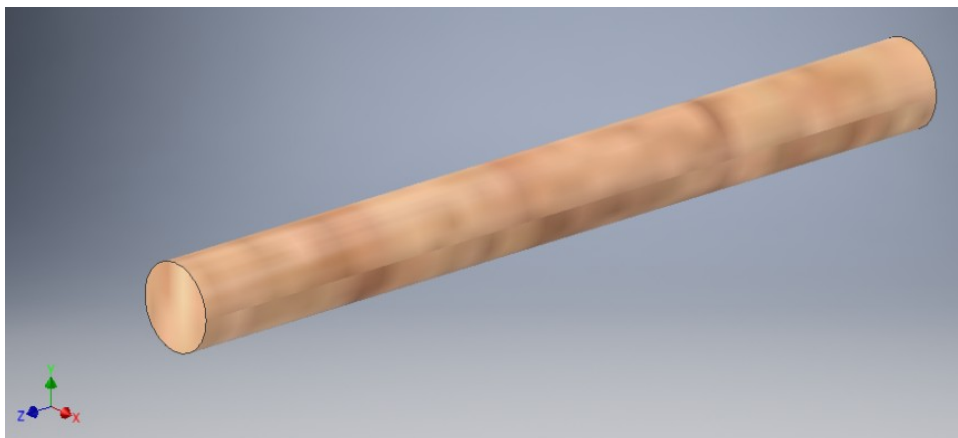


Obrázek 20 - Kostra

2.6 Návrh hřídelů

V 3D modelu jsou čtyři hřídele. Dva hřídele o průměru 4 mm a délce 40 mm, které slouží k propojení jednotlivých rámců (technický výkres viz. příloha L). Dále 2 hřídele

o průměru 4 mm a délce 60 mm sloužící ke spojení rámu s motory klopení a klonění (technický výkres viz. příloha M) a poslední hřídel má průměr 6 mm a délku 300 mm. tato hřídel slouží k propojení azimutálního motoru a základny (technický výkres viz. příloha N).



Obrázek 21 - Hřídel

2.7 Návrh podstavy

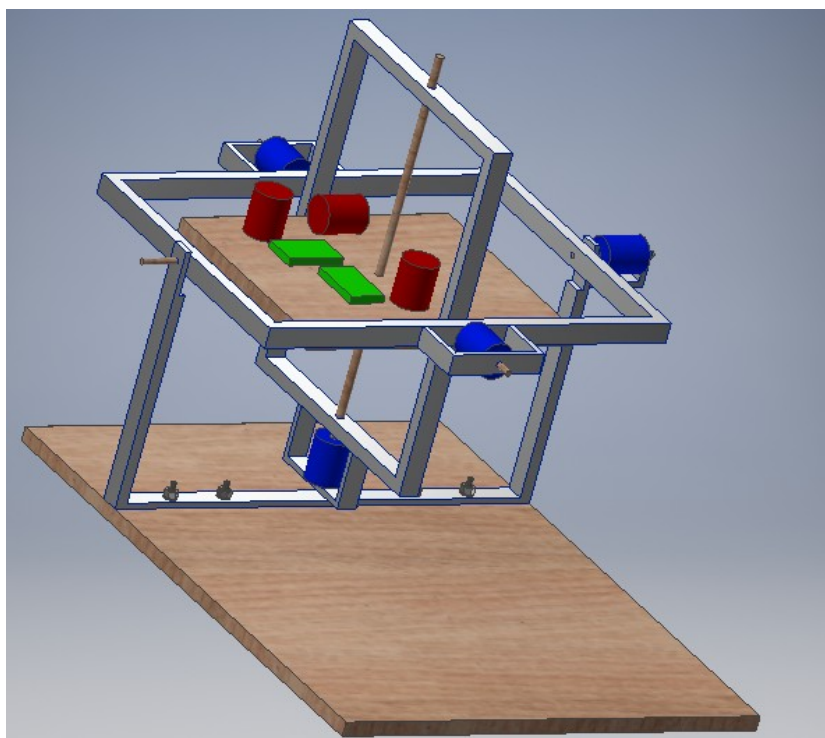
Podstavu tvoří obdélníková deska o délce 400 mm, šířce 310 mm a tloušťce 10 mm. Podstava je opatřena čtyřmi otvory pro šrouby M4 x 22 mm, které spojují kostru s podstavou. Technický výkres podstavy je v příloze O.



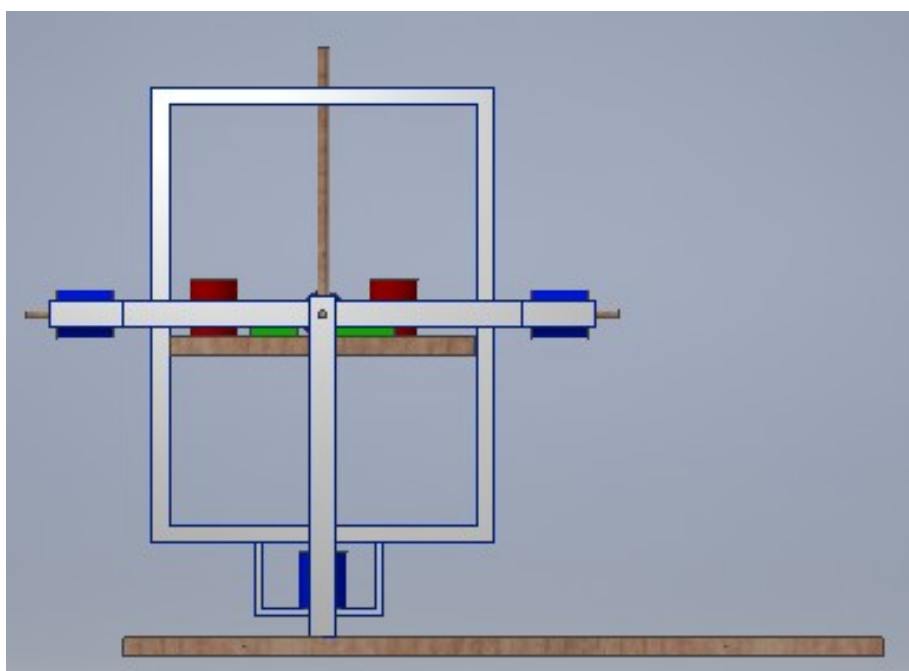
Obrázek 22 - Podstava

2.8 3D model kompletního návrhu

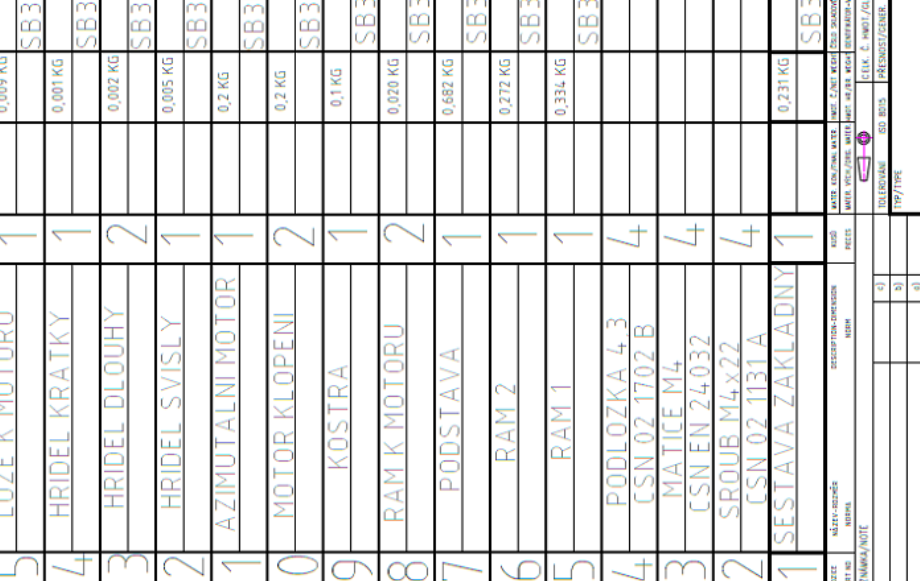
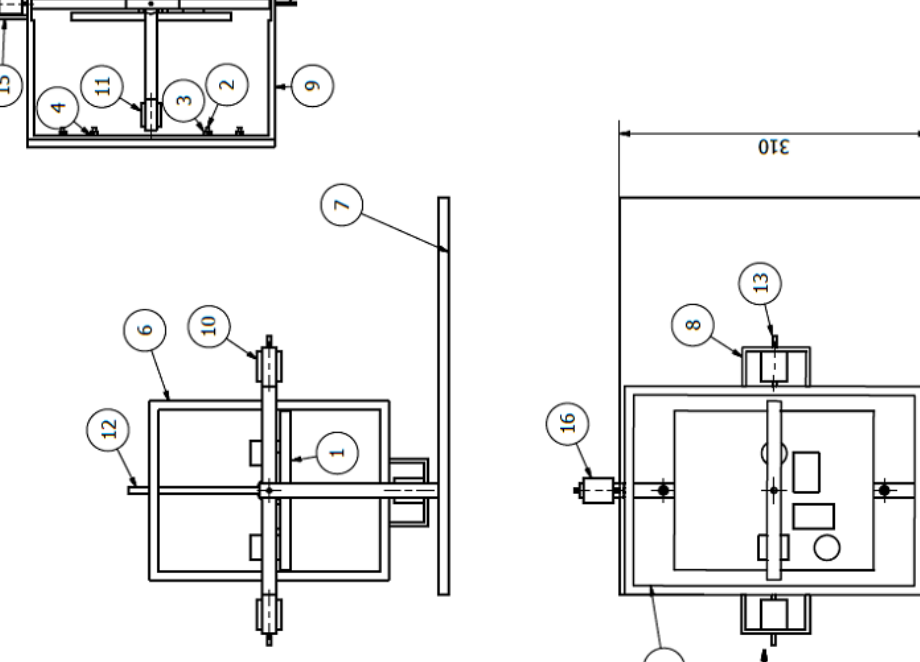
Po zkonstruování všech dílů byl sestaven 3D model kompletní sestavy návrhu obsahující všechny potřebné komponenty. Dále byl vytvořen technický výkres sestavy, na kterém jsou zakótovány všechny díly které se v 3D modelu nachází.



Obrázek 23 - 3D model Návrhu INS



Obrázek 24 - 3D návrh INS - pohled z boku

D (1:5)		A	
			
D		A	
C		B	
1		2	
3		4	
5		6	
7		8	
9		10	
11		12	
13		14	
15		16	
17		18	
19		20	
21		22	
23		24	
25		26	
27		28	
29		30	
31		32	
33		34	
35		36	
37		38	
39		40	
41		42	
43		44	
45		46	
47		48	
49		50	
51		52	
53		54	
55		56	
57		58	
59		60	
61		62	
63		64	
65		66	
67		68	
69		70	
71		72	
73		74	
75		76	
77		78	
79		80	
81		82	
83		84	
85		86	
87		88	
89		90	
91		92	
93		94	
95		96	
97		98	
99		100	
101		102	
103		104	
105		106	
107		108	
109		110	
111		112	
113		114	
115		116	
117		118	
119		120	
121		122	
123		124	
125		126	
127		128	
129		130	
131		132	
133		134	
135		136	
137		138	
139		140	
141		142	
143		144	
145		146	
147		148	
149		150	
151		152	
153		154	
155		156	
157		158	
159		160	
161		162	
163		164	
165		166	
167		168	
169		170	
171		172	
173		174	
175		176	
177		178	
179		180	
181		182	
183		184	
185		186	
187		188	
189		190	
191		192	
193		194	
195		196	
197		198	
199		200	
201		202	
203		204	
205		206	
207		208	
209		210	
211		212	
213		214	
215		216	
217		218	
219		220	
221		222	
223		224	
225		226	
227		228	
229		230	
231		232	
233		234	
235		236	
237		238	
239		240	
241		242	
243		244	
245		246	
247		248	
249		250	
251		252	
253		254	
255		256	
257		258	
259		260	
261		262	
263		264	
265		266	
267		268	
269		270	
271		272	
273		274	
275		276	
277		278	
279		280	
281		282	
283		284	
285		286	
287		288	
289		290	
291		292	
293		294	
295		296	
297		298	
299		300	
301		302	
303		304	
305		306	
307		308	
309		310	
311		312	
313		314	
315		316	
317		318	
319		320	
321		322	
323		324	
325		326	
327		328	
329		330	
331		332	
333		334	
335		336	
337		338	
339		340	
341		342	
343		344	
345		346	
347		348	
349		350	
351		352	
353		354	
355		356	
357		358	
359		360	
361		362	
363		364	
365		366	
367		368	
369		370	
371		372	
373		374	
375		376	
377		378	
379		380	
381		382	
383		384	
385		386	
387		388	
389		390	
391		392	
393		394	
395		396	
397		398	
399		400	
401		402	
403		404	
405		406	
407		408	
409		410	
411		412	
413		414	
415		416	
417		418	
419		420	
421		422	
423		424	
425		426	
427		428	
429		430	
431		432	
433		434	
435		436	
437		438	
439		440	
441		442	
443		444	
445		446	
447		448	
449		450	
451		452	
453		454	
455		456	
457		458	
459		460	
461		462	
463		464	
465		466	
467		468	
469		470	
471		472	
473		474	
475		476	
477		478	
479		480	
481		482	
483		484	
485		486	
487		488	
489		490	
491		492	
493		494	
495		496	
497		498	
499		500	
501		502	
503		504	
505		506	
507		508	
509		510	
511		512	
513		514	
515		516	
517		518	
519		520	
521		522	
523		524	
525		526	
527		528	
529		530	
531		532	
533		534	
535		536	
537		538	
539		540	
541		542	
543		544	
545		546	
547		548	
549		550	
551		552	
553		554	
555		556	
557		558	
559		560	
561		562	
563		564	
565		566	
567		568	
569		570	
571		572	
573		574	
575		576	
577		578	
579		580	
581		582	
583		584	
585		586	
587		588	
589		590	
591		592	
593		594	
595		596	
597		598	
599		600	
601		602	
603		604	
605		606	
607		608	
609		610	
611		612	
613		614	
615		616	
617		618	
619		620	
621		622	
623		624	
625		626	
627		628	
629		630	
631		632	
633		634	
635		636	
637		638	
639		640	
641		642	
643		644	
645		646	
647		648	
649		650	
651		652	
653		654	
655		656	
657		658	
659		660	
661		662	
663		664	
665		666	
667		668	
669		670	
671		672	
673		674	
675		676	
677		678	
679		680	
681		682	
683		684	
685		686	
687		688	
689		690	
691		692	
693		694	
695		696	
697		698	
699		700	
701		702	
703		704	
705		706	
707		708	
709		710	
711		712	
713		714	
715		716	
717		718	
719		720	
721		722	
723		724	
725		726	
727		728	
729		730	
731		732	
733		734	
735		736	
737		738	
739		740	
741		742	
743		744	
745		746	
747		748	
749		750	
751		752	
753		754	
755		756	
757		758	
759		760	
761		762	
763		764	
765		766	
767		768	
769		770	
771		772	
773		774	
775		776	
777		778	
779		780	
781		782	
783		784	
785		786	
787		788	
789		790	
791		792	
793		794	
795		796	
797		798	
799		800	
801		802	
803		804	
805		806	
807		808	
809		810	
811		812	
813		814	
815		816	
817		818	
819		820	
821		822	
823		824	
825		826	
827		828	
829		830	
831		832	
833		834	
835		836	
837		838	
839		840	
841		842	
843		844	
845		846	
847		848	
849		850	
851		852	
853		854	
855		856	
857		858	
859		860	
861		862	
863		864	
865		866	
867		868	
869		870	
871		872	
873		874	
875		876	
877		878	
879		880	
881		882	
883		884	
885		886	
887		888	
889		890	
891		892	
893		894	
895		896	
897		898	
899		900	
901		902	
903		904	
905		906	
907		908	
909		910	
911		912	
913		914	
915		916	
917		918	
919		920	
921		922	
923		924	
925		926	
927		928	
929		930	
931		932	
933		934	
935		936	
937		938	

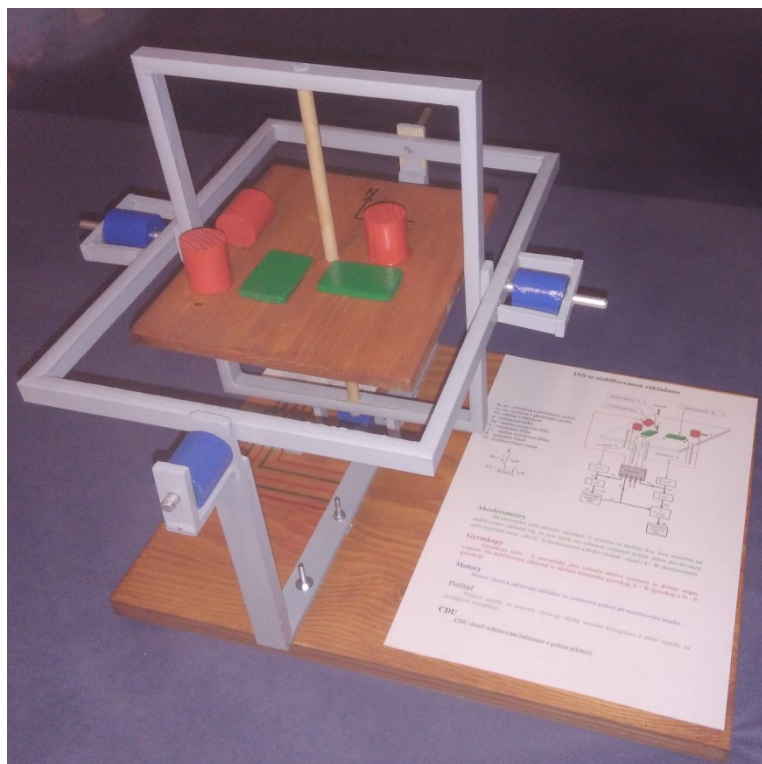
3 Realizace přípravku INS

3.1 Účel

Přípravek je realizován podle návrhu, jehož konstrukce je popsána v předchozí kapitole. Přípravek je realizován za účelem názorného vysvětlení základních principů funkce INS se stabilizovanou základnou. Je na ní vidět základní princip ustavení stabilizované základny ve vodorovné ose pomocí kardanového závěsu, který dává základně 3 stupně volnosti. Dále je na přípravku vidět rozmístění jednotlivých komponent systému. Je v něm také popsán tok dat od senzorů až po zobrazení informací pilotovi a zjednodušený způsob přeměny elektrických signálů získaných ze senzoru na zeměpisné souřadnice. Podrobný výpočet souřadnic je popsán v první kapitole. Dále je realizován model laserového gyroskopu, který slouží k popisu principu funkce laserových gyroskopu. Laserový gyroskop byl vybrán, protože je v dnešních systémech INS nejpoužívanější.

3.2 Realizace přípravku

Pro realizaci přípravku byl jako výchozí materiál zvolen smrkové dřevo z důvodu dobré opracovatelnosti. Je z něj vyrobena kostra, lože motorů, stabilizovaná základna a senzory. Rámy a kolíky vyžadují větší pevnost, a proto jsou vyrobeny z hliníkového plechu. Makety motorů, u kterých je zapotřebí velká hmotnost, jsou vyrobeny z železné tyče. Podstava je vyrobena z překližky. Přípravek je nabarven modelářskými barvami a na barvení podstavy je použit lak na dřevo. Spojení součástí je realizováno pomocí lepidla a uchycení kostry k podstavě je realizováno pomocí šroubů. Pro opracování materiálu byly použity technologie vrtání, řezání a hoblování.



Obrázek 26 - Realizace přípravku

3.3 Princip uchování základny ve vodorovné poloze

Jak už bylo v předchozí části práce řečeno, přípravek má za účel názorně ukázat základní princip uchování stabilizované základny ustavené v kardanovém závěsu ve vodorovné poloze, popsat jednotlivé části systému a získávání zeměpisných souřadnic. U reálného systému INS je rovnováha zajišťována pomocí elektromotorů. U přípravku je rovnováha zajišťována pomocí základních fyzikálních mechanismů jako jsou páka a kyvadlo. Makety motorů v tomto případě slouží jako břemena.

3.3.1 Velký rám

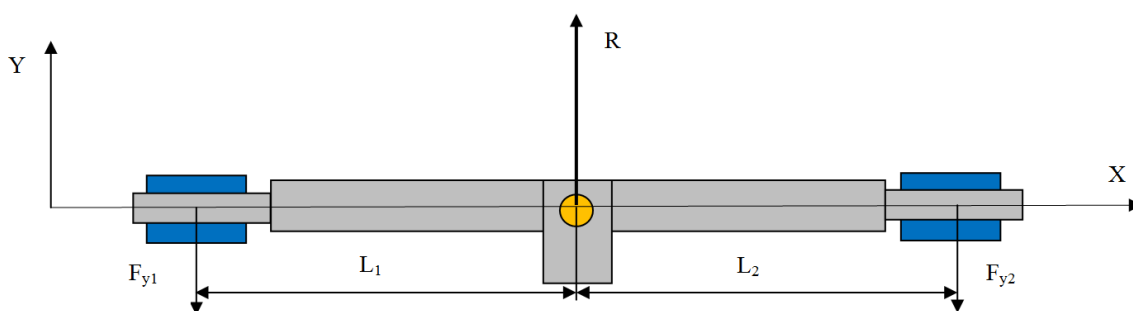
U velkého rámu (300 x 210 mm) je zachování vodorovné polohy při vychýlení kostry realizováno za pomoci rovnováhy sil na páce, která zajišťuje, že při vychýlení kostry z vodorovné polohy stabilizovaná základna ustavená v kardanovém závěsu, (který je uchycen v kostře pomocí dřevěných kolíků a tvoří otočný spoj) setrvává ve vodorovné poloze i při vychýlení z vodorovné polohy.

Aby byl tento princip fungoval, musí být dodržena podmínka rovnováhy sil na páce, která je dána rovnováhou momentů sil. Moment síly je dán tíhou břemena o síle F , násobené délkou ramena L od momentového bodu.

$$M_1 = M_2$$

$$F_1 \times L_1 = F_2 \times L_2$$

V případě velkého rámu břemena představují motory uchycené na bocích rámu. Délka ramena je dána vzdáleností břemene od kolíku spojujícího rám s kostrou, v jehož ose otáčení se nachází momentový bod.



Obrázek 27 - Rozložení sil na velkém rámu

- Výpočet

Na obrázku č. 26 je znázornění sil působících vzhledem k momentovému bodu. Tyto síly $F_{y1,2}$ jsou dány gravitační silou, která je dána hmotností břemena m , násobenou tíhovým zrychlením g . V momentovém bodě vzniká výsledná reakce sil R , působící v opačném směru než jednotlivé složky sil a je rovna součtu velikostí sil F_{y1} , F_{y2} . Délka ramena je vypočítána z rozměrů jednotlivých komponent, které rám obsahuje. Rozměry komponent jsou popsány ve výkresové dokumentaci. Jelikož síly působí pouze v ose y a jsou kolmé k ramenu, není potřeba síly rozkládat na složky ve směru x a y , proto stačí pro určení rovnováhy jednoduchý výpočet, který je proveden níže.

$$g = 9,81 \, m \times s^{-2}$$

$$m = 0,2 \, kg$$

$$L_1 = L_2 = 0,1235 \, m$$

$$F = m \times g$$

$$F = 0,2 \times 9,81$$

$$F = 1,926 \, N$$

$$F_{y1} = F_{y2} = 1,926 \text{ N}$$

$$F_1 \times L_1 = F_2 \times L_2$$

$$1,926 \times 0,1235 = 1,926 \times 0,1235$$

$$0,24 \text{ N} \times m = 0,24 \text{ N} \times m$$

$M_1 = M_2 \rightarrow$ podmínka rovnováhy je splněna

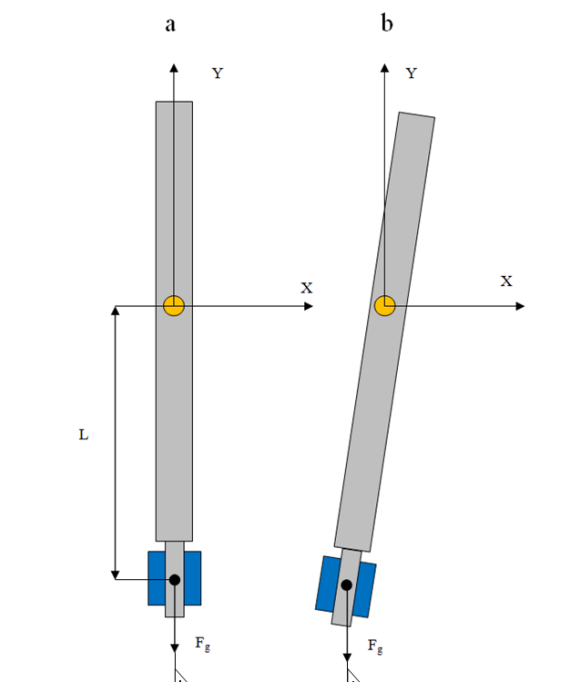
$$R = F_{y1} + F_{y2}$$

$$R = 1,926 + 1,926$$

$$R = 3,852 \text{ N}$$

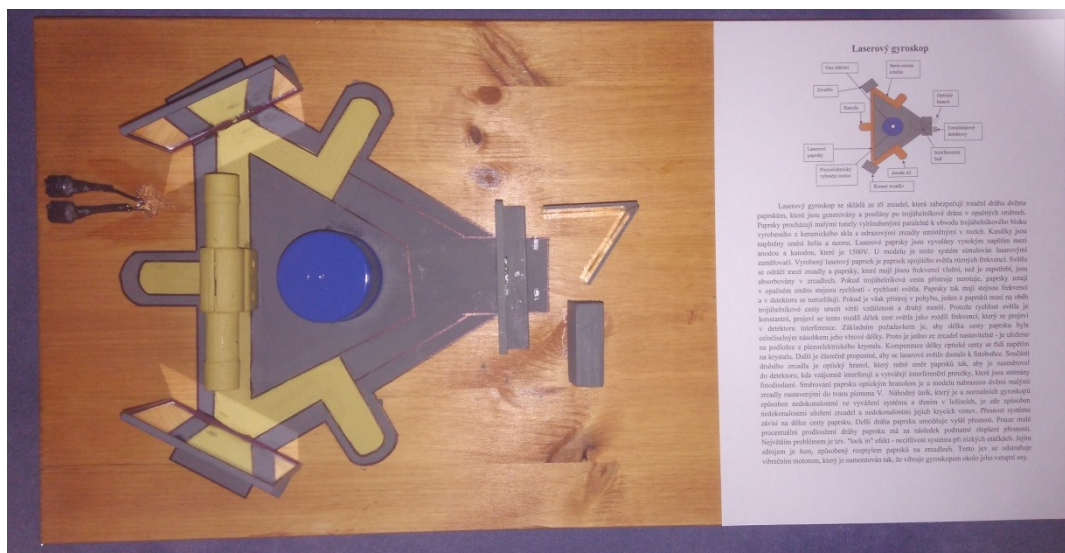
3.3.2 Malý rám

U malého rámu (240 x 180 mm) je zachování jeho svislé polohy (vodorovné polohy základny) zajištěno pomocí tíhové síly, která působí kolmo k povrchu země (viz. obr.č. 27 a), a proto při snaze vychýlit rám ze svislé polohy se potenciální energie břemena mění na kinetickou a navrátí se do stavu, kdy jeho tíhová síla působí kolmo k zemi (viz. obr. č. 27 b). Z fyzikálního hlediska se jedná o kyvadlo, ale jelikož při vychýlení ze svislé polohy, dochází k rychlému navrácení do výchozí polohy a kvůli ustavení rámu v otočných čepích (kolících), dochází k velkému tření mezi čepy a dírami, tak se rám pouze navrátí do výchozí polohy a k celému kyvu nedochází.



Obrázek 28 - rozložení sil na malém rámu.

Model laserového gyroskopu je postaven na dřevěné základové desce, na níž jsou ustaveny všechny komponenty. Jako zdroj laserového paprsku jsou použity dva laserové zaměřovače, které simulují laserové paprsky vyvolané napětím mezi katodou a anodou. Dále model obsahuje tři zrcadla, která slouží k odražení a směřování paprsku do krystalu a následně do detektoru. Dvě zrcadla jsou nepropustná a jedno propustné, aby paprsky mohly proniknout do optického hranolu, který paprsky směřuje do detektoru. Optický hranol simulují dvě malá zrcadla ustavená do tvaru písmene V. Detektor je tvořen dřevěným kvádrem a slouží k zachycení obou paprsků a vyhodnocení frekvencí, na jejichž základě se měří úhlové rychlosti. Podrobný popis laserových gyroskopů je popsán v kapitole č. 1. 4. 2. .



Obrázek 29 - Realizace laserového gyroskopu

Závěr

V bakalářské práci zabývající se přípravkem na inerciální navigační systém je popsán způsob určování polohy v prostoru. Dále je provedena podrobná analýza INS, v které je popsán princip funkce INS, popis a vysvětlení funkce senzorů, které systém využívá, zpracování údajů ze senzorů a jejich přeměna na zeměpisné souřadnice. Dále je uvedeno rozdělení a popis jednotlivých typů INS, korekce, chyby senzorů, nastavení systému a proces získávání informací ze senzorů až po zobrazení.

V dnešní době se díky technickým možnostem využívá pro navigaci mnoho navigačních systémů, které díky své vzájemné spolupráci tvoří velice přesný a spolehlivý systém navigace, který výrazně zvyšuje bezpečnost a efektivitu letecké dopravy, ale na druhou stranu klade větší nároky na kvalitu výroby, údržby i samotné obsluhy. Aby tyto požadavky mohly být dodrženy, musí být všichni pracovníci, kteří s těmito systémy pracují nebo určitým způsobem manipulují (konstruktéři, vývojáři, údržbáři, piloti...), obeznámeni se základními principy těchto systémů, bez jejíž pochopení s nimi nelze bezpečně a efektivně pracovat.

V druhé části práce je proto vytvořen návrh přípravku INS se stabilizovanou základnou, který je navržen tak, aby vizuálně znázorňoval základní části systému a princip jeho funkce. Zároveň je návrh proveden tak, aby se dal přípravek v rámci omezených technických možností zrealizovat.

V poslední části práce je přípravek zrealizován tak, aby zajišťoval stabilizované základně 3 stupně volnosti díky kardanově závěsu. Dále je zrealizován model laserového gyroskopu, který slouží k lepšímu popisu dnes nejpoužívanějšího druhu gyroskopu. Oba přípravky jsou doplněny stručným popisem.

Seznam použité literatury

- [1]. **Volner, Rudolf.** *Digitální technologie - elektronické přístrojové systémy*. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007.
- [2]. **STAVOVČÍK, Boleslav.** *Obecná navigace* . Brno : CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-576-1.
- [3]. **Bílý, Marek.** IEEE Standard for Inertial Sensor Terminology. [Online] <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=7672>. .

Seznam použitých obrázků

Obrázek 1 - Příklad orientace a pozice v referenční vztažné soustavě [3].....	13
Obrázek 2 - Příklad získávání informací o poloze ze senzorů	15
Obrázek 3 - Akcelerometr	17
Obrázek 4 - Princip gyroskopu	18
Obrázek 5 - Princip optického gyroskopu.....	19
Obrázek 6 - Princip laserového gyroskopu	20
Obrázek 7 - Stabilizovaná základny	21
Obrázek 8 - Blokové uspořádání systému	25
Obrázek 9 - Funkční schéma AHRS systému	26
Obrázek 10 - Funkční schéma IRS systému	26
Obrázek 11 - Funkční schéma INS systém	27
Obrázek 12 - Schéma ADIRS.....	30
Obrázek 13 - Volič módu	31
Obrázek 14 - Standardní ovládací panel CDU	32
Obrázek 15 - Sestava základny.....	35
Obrázek 16 - Rám.....	36
Obrázek 17 - Motorové lože typu L.....	37
Obrázek 18 - Motorové lože typu U	37
Obrázek 19 - Maketa motoru.....	38
Obrázek 20 - Kostra.....	38

Obrázek 21 - Hřídel	39
Obrázek 22 - Podstava	39
Obrázek 23 - 3D model Návrhu INS	40
Obrázek 24 - 3D návrh INS - pohled z boku.....	40
Obrázek 25 - Výkres sestavy	41
Obrázek 26 - Realizace přípravku	43
Obrázek 27 - Rozložení sil na velkém rámu	44
Obrázek 28 - rozložení sil na malém rámu.....	45
Obrázek 29 - Realizace laserového gyroskopu.....	46

Seznam použitých tabulek

Tabulka 1 - Korekce gyroskopů	23
Tabulka 2 - Korekce senzorů.....	24

Seznam příloh

Příloha A – Výkres základny
Příloha B – Výkres gyroskopu
Příloha C – Výkres akcelerometru
Příloha D – Výkres rámu 1
Příloha E – Výkres rámu 2
Příloha F – Výkres rámu k motoru
Příloha G – Výkres rámu k motoru
Příloha H – Výkres azimutálního motoru
Příloha I – Výkres motoru klonění
Příloha J – Výkres motoru klopní
Příloha K – Výkres kostry
Příloha L – Výkres hřídele krátkého
Příloha M – Výkres hřídele dlouhého
Příloha N – Výkres svislého hřídele
Příloha O – Výkres podstavy